

皖南山核桃果实表型性状和 种仁主要养分含量的比较及相关性分析

翟大才¹, 姚琦², 潘健¹, 何芝兰¹, 柏晓辉¹, 毕淑峰¹, 曹秀峰², 赖玖鑫^{3,①}

(1. 黄山学院生命与环境科学学院, 安徽 黄山 245041; 2. 歙县林业局, 安徽 歙县 245200;
3. 中国林业科学研究院林业研究所 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091)

摘要: 对皖南宁国市、歙县、旌德县和绩溪县山区 12 个样点山核桃 (*Carya cathayensis* Sarg.) 果实 10 个表型性状和种仁 7 个主要养分含量进行了比较和变异分析, 并对这些指标进行了 Pearson 相关性分析。结果表明: 供试 12 个样点山核桃的果皮厚度为 5.02~6.23 mm, 单果质量为 13.10~21.71 g, 果实的横径和纵径分别为 27.70~34.28 和 31.30~39.72 mm, 单坚果质量为 3.58~5.42 g, 坚果的横径和纵径分别为 19.23~21.60 和 21.83~25.75 mm, 坚果壳厚度为 0.92~1.09 mm, 出籽率和出仁率分别为 24.43%~28.31% 和 39.03%~48.10%; 种仁的蛋白质和粗脂肪含量分别为 91.1~130.2 和 468.5~548.8 mg·g⁻¹, 粗脂肪中硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量分别为 3.78%~4.25%、11.63%~12.49%、51.37%~55.57%、25.01%~28.93% 和 0.29%~0.39%。其中, 单果质量、蛋白质含量以及亚油酸和亚麻酸相对含量的变异较大, 变异系数分别为 14.16%、21.75%、10.93% 和 22.35%, 其余指标的变异系数均低于 10.00%。总体来看, 果实表型性状间的相关性不显著, 但种仁主要养分含量间的相关性却显著; 坚果横径、坚果壳厚度、出籽率和出仁率与蛋白质和粗脂肪含量以及硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量总体上显著相关, 其余果实表型性状与种仁主要养分含量总体上不显著相关。研究结果显示: 皖南山核桃种仁的不饱和脂肪酸含量较高, 且不同样点果实表型性状和种仁主要养分含量存在明显差异; 并且, 山核桃的坚果横径、坚果壳厚度、出籽率和出仁率对其种仁养分含量有显著影响。

关键词: 山核桃; 皖南; 表型性状; 主要养分; 相关性分析

中图分类号: Q945.6⁺5; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)02-0010-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.02.02

Comparison and correlation analysis on phenotypic characters of fruit and main nutrient contents in kernel of *Carya cathayensis* in Southern Anhui ZHAI Dacai¹, YAO Qi², PAN Jian¹, HE Zhilan¹, BAI Xiaohui¹, BI Shufeng¹, CAO Xiufeng², LAI Jiuxin^{3,①} (1. College of Life and Environmental Science, Huangshan University, Huangshan 245041, China; 2. Shexian County Forestry Bureau, Shexian 245200, China; 3. National Key Laboratory of Forest Genetics and Breeding, Forestry Research Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(2): 10-17

Abstract: Comparison and variation analysis on 10 phenotypic characters of fruit and 7 main nutrient contents in kernel of *Carya cathayensis* Sarg. from 12 plots in mountainous areas of Ningguo City, Shexian County, Jingde County and Jixi County of Southern Anhui were carried out, and the Pearson correlation among these indexes was analyzed. The results show that pericarp thickness of *C. cathayensis* from 12 plots tested is 5.02-6.23 mm, single fruit mass does 13.10-21.71 g, fruit horizontal and vertical diameters do 27.70-34.28 and 31.30-39.72 mm, respectively, single nut mass does 3.58-

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 国家林业局科技中心林业科技发展项目(GR-核桃-2号); 国家林业公益性行业科研专项项目(201304407); 国家林木种质资源共享服务平台项目(2005DKA21003); 安徽省林业科技创新研究项目(AHLYCX-2018-10; AHLYCX-2018-29)

作者简介: 翟大才(1963—),男,安徽无为,人,本科,副教授,主要从事林木遗传育种学、经济林栽培学教学和科研。

①通信作者 E-mail: jackolai@126.com

5.42 g, nut horizontal and vertical diameters do 19.23–21.60 and 21.83–25.75 mm, respectively, nut shell thickness does 0.92–1.09 mm, seed and kernel yield rates do 24.43%–28.31% and 39.03%–48.10%, respectively. Contents of protein and crude fat in kernel are 91.1–130.2 and 468.5–548.8 mg · g⁻¹, respectively, and relative contents of stearic acid, palmitic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid in crude fat are 3.78%–4.25%, 11.63%–12.49%, 51.37%–55.57%, 25.01%–28.93% and 0.29%–0.39%, respectively. In which, variations of single fruit mass, protein content and relative contents of linoleic acid and linolenic acid are greater, their coefficients of variation are 14.16%, 21.75%, 10.93% and 22.35%, respectively, and those of other indexes are all lower than 10.00%. In general, there is no significant correlation among phenotypic characters of fruit, but there are significant correlations among main nutrient contents in kernel. There are significant correlations of nut horizontal diameter, nut shell thickness, and seed and kernel yield rates with contents of protein and crude fat and relative contents of stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid in general, and there is no significant correlation of other phenotypic characters of fruit with main nutrient contents in kernel in general. It is suggested that unsaturated fatty acid content in kernel of *C. cathayensis* in Southern Anhui is relatively high, and there are obvious differences in phenotypic characters of fruit and main nutrient contents in kernel among different plots. Besides, nut horizontal diameter, nut shell thickness, and seed and kernel yield rates of *C. cathayensis* have significant effects on nutrient content in its kernel.

Key words: *Carya cathayensis* Sarg.; Southern Anhui; phenotypic characters; main nutrient; correlation analysis

山核桃 (*Carya cathayensis* Sarg.) 隶属于胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.), 在中国主要分布于长江流域东部的亚热带地区, 具有果大、壳薄、出仁率高和出油率高等特征, 果实中含有丰富的生物活性成分, 具有抗氧化、降低胆固醇和预防心血管疾病等功能, 因此, 山核桃是一种极具开发利用价值的特色木本油料树种^[1]。目前国内学者关于山核桃的研究主要集中在分类学^[2-3]、生态学^[4]和遗传多样性^[5-6]等方面, 对不同品种和居群山核桃的种实性状表型多样性和营养成分等也有初步研究^[7-8]。对植物开展表型性状多样性研究有助于了解植物的基因型差异, 明确植物的适应性及进化的方式、机制和影响因子^[9-10]。个体表型性状检测是一种简便且有效的植物种质鉴定方法^[11-12], 然而, 植物的个体表型性状并不是孤立的, 各表型性状间存在丰富的相关性^[10, 13-15], 因此, 在对植物种质资源进行评价时需要考虑各表型性状间的相关性, 通过综合分析获得更加科学和合理的研究结论。

随着现代生命科学技术的发展, 分子生物学技术已被广泛用于植物研究, 目前已经有学者采用分子生物学和功能基因组学方法开展山核桃种仁油脂和蛋白质含量及其生物合成机制等方面的研究工作^[16], 但关于特定地区山核桃果实表型性状的多样性和适应性以及山核桃果实表型性状的地区差异等研究工作尚未全面展开, 在一定程度上限制了山核桃种仁活

性成分生物合成机制的深入研究, 不利于山核桃优良品种的选育。

皖南地区是中国山核桃的主产区之一, 作者对皖南宁国市、歙县、旌德县和绩溪县等地山区 12 个样点山核桃的果实表型性状及种仁主要养分含量进行了比较和变异分析, 并对各指标进行了 Pearson 相关性分析, 旨在为深入研究山核桃的果实遗传变异及种仁活性成分生物合成机制提供基础资料, 为山核桃的良种选育、营养品质评价及油产品开发利用提供科学依据, 并对进一步探究皖南地区山核桃果实发育期间油脂的合成规律及其内在分子调控机制^[17-18]具有一定的指导意义。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

皖南地区的山核桃天然分布于宁国市、歙县、旌德县和绩溪县等地的山区, 该区域年平均气温 15.5 °C ~ 16.5 °C; 年平均降水量在 1 500 mm 以上, 且降水主要集中在 4 月份至 9 月份; 年平均空气相对湿度 76% ~ 80%; 无霜期 220 ~ 230 d; 土壤的排水状况良好, 土壤类型为黄壤或红壤^[19]。该区域植物多样性极为丰富, 共有种子植物 2 498 种, 包括裸子植物 13 属 18 种、单子叶植物 211 属 593 种和双子叶植物 674 属 1 887 种^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 通过走访当地群众、查阅档案资料、实地调查及初步测定相关性状等方法获得皖南地区的山核桃资源状况,最终确定对 12 个相对独立样点的野生山核桃进行研究,各样点的具体位置和样株数见表 1。在每个样点选择株距在 100 m 以上且健

康的山核桃实生植株,做好标记;于 2015 年 9 月 7 日和 8 日(白露前后)在各样点分别采集样株树冠中上部外围四周枝条上具有代表性且果形饱满的成熟果实,每株采集 5 kg 果实;将每株样株采集的果实分别装入布袋中,立即送回实验室进行相关果实表型性状测量。

表 1 皖南 12 个山核桃样点的具体位置和样株数

Table 1 Specific location and sample plant number of 12 plots of *Carya cathayensis* Sarg. in Southern Anhui

编号 No.	样点 Plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	样株数 Sample plant number
P1	宁国市胡乐镇 Hule Town of Ningguo City	N30°17'48"-N30°17'53"	E118°43'06"-E118°43'14"	225-250	28
P2	宁国市霞西镇 Xiaxi Town of Ningguo City	N30°24'28"-N30°24'57"	E118°56'59"-E118°57'10"	524-607	26
P3	宁国市仙霞镇 Xianxia Town of Ningguo City	N30°21'39"-N30°21'53"	E119°14'20"-E119°19'20"	266-313	30
P4	宁国市南极乡 Nanji Township of Ningguo City	N30°21'52"-N30°21'53"	E119°00'14"-E119°00'23"	170-194	32
P5	歙县杞梓里镇 Qizili Town of Shexian County	N29°55'58"-N29°58'25"	E118°47'55"-E118°48'47"	347-637	30
P6	歙县岔口镇 Chakou Town of Shexian County	N29°51'46"-N29°51'56"	E118°46'34"-E118°46'42"	388-452	25
P7	歙县三阳镇 Sanyang Town of Shexian County	N30°02'35"-N30°02'40"	E118°48'19"-E118°48'24"	308-343	21
P8	旌德县俞村乡 Yucun Township of Jingde County	N30°22'35"-N30°22'38"	E118°41'46"-E118°48'19"	330-362	21
P9	旌德县云乐乡 Yunle Township of Jingde County	N30°27'39"-N30°46'55"	E118°39'23"-E118°56'29"	357-367	21
P10	绩溪县伏岭镇 Fuling Town of Jixi County	N30°06'24"-N30°06'56"	E118°47'17"-E118°47'41"	591-660	31
P11	绩溪县家朋乡 Jiapeng Township of Jixi County	N30°14'55"-N30°15'14"	E118°30'01"-E118°51'59"	360-509	26
P12	绩溪县荆州乡 Jingzhou Township of Jixi County	N30°10'50"-N30°13'55"	E118°49'37"-E118°53'35"	596-795	33

1.2.2 果实表型性状测量 充分混匀后,随机选取 30 个果实,测量单果质量以及果实的横径和纵径;剥离果皮后,测量果皮厚度、单坚果质量以及坚果的横径和纵径;剥壳、取仁,测量坚果壳厚度和种仁质量;根据测量结果计算出籽率和出仁率,计算公式分别为出籽率=(单坚果质量/单果质量)×100%和出仁率=(种仁质量/单坚果质量)×100%。使用电子天平(精度 0.001 g)测量单果和单坚果的质量,使用电子游标卡尺(精度 0.01 mm)测量果实和坚果的横径和纵径,使用电子千分尺(精度 0.01 mm)测量果皮和坚果壳的厚度。

1.2.3 种仁主要养分含量测定 待果实表型性状测量完毕后,将种仁自然晾干后粉碎,装瓶,用于种仁主要养分含量测定。参照 GB 50095—2010 中的分光光度法,经加热消煮后,以硫酸铵为对照品,测定种仁中蛋白质含量;参照 GB/T 14772—2008 中的方法测定种仁中粗脂肪含量;参照 GB/T 17376—2008 中的方法对提取的粗脂肪样品进行甲酯化处理,并参照 GB/T 17377—2008 中的方法分别测定并计算粗脂肪中硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和亚麻酸的相对含量。每株称取 3 份样品进行测定。

1.3 数据处理及分析

使用 SPSS 22.0 统计分析软件,采用 Duncan's 新复极差法对不同样点的相关实验数据进行多重比较,并对各指标进行 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 皖南不同样点山核桃果实表型性状的比较

皖南不同样点山核桃果实表型性状的比较结果见表 2。由表 2 可见:绩溪县家朋乡样点山核桃的果皮厚度最大,为 6.23 mm;旌德县云乐乡样点山核桃的果皮厚度次之,为 6.01 mm;歙县三阳镇样点山核桃的果皮厚度最小,为 5.02 mm。旌德县云乐乡样点山核桃的单果质量最大,为 21.71 g;宁国市胡乐镇样点山核桃的单果质量次之,为 18.04 g;绩溪县伏岭镇样点山核桃的单果质量最小,为 13.10 g。旌德县云乐乡样点山核桃果实的横径和纵径也最大,分别为 34.28 和 39.72 mm;宁国市胡乐镇样点山核桃果实的横径和纵径次之,分别为 32.29 和 35.88 mm;绩溪县伏岭镇样点山核桃果实的横径和纵径最小,分别为 27.70 和 31.30 mm。旌德县云乐乡样点山核桃的单

坚果质量最大,为 5.42 g;宁国市仙霞镇样点山核桃的单坚果质量次之,为 4.95 g;绩溪县伏岭镇样点山核桃的单坚果质量最小,为 3.58 g。旌德县云乐乡样点山核桃坚果的横径和纵径也最大,分别为 21.60 和 25.75 mm;宁国市仙霞镇样点山核桃的坚果纵径次之,为 25.06 mm,宁国市南极乡样点山核桃的坚果横径次之,为 21.03 mm;绩溪县伏岭镇样点山核桃坚果的横径和纵径最小,分别为 19.23 和 21.83 mm。宁国市胡乐镇样点山核桃的坚果壳厚度最大,为 1.09 mm;旌德县云乐乡样点山核桃的坚果壳厚度次之,为 1.07 mm;宁国市霞西镇样点山核桃的坚果壳厚度最小,为 0.92 mm。宁国市仙霞镇样点山核桃的出籽率最大,为 28.31%;宁国市南极乡样点山核桃的出籽率次之,为 28.03%;绩溪县荆州乡样点山核桃的出籽率

最小,为 24.43%。旌德县云乐乡样点山核桃的出仁率最大,为 48.10%;宁国市仙霞镇样点山核桃的出仁率次之,为 47.78%;绩溪县荆州乡样点山核桃的出仁率最小,为 39.03%。

由表 2 还可见:不同样点山核桃果实的上述 10 个表型性状存在明显差异,变异系数为 4.07%~14.16%,其中,单果质量的变异系数最大,坚果横径的变异系数最小。

2.2 皖南不同样点山核桃种仁主要养分含量的比较

皖南不同样点山核桃种仁主要养分含量的比较结果见表 3。由表 3 可见:歙县岔口镇样点山核桃种仁的蛋白质含量最高,为 130.2 mg·g⁻¹;绩溪县荆州乡和宁国市南极乡 2 个样点山核桃种仁的蛋白质含量也较高,分别为 129.7 和 128.4 mg·g⁻¹;绩溪县家

表 2 皖南不同样点山核桃果实表型性状的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on phenotypic characters of fruit of *Carya cathayensis* Sarg. from different plots in Southern Anhui ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样点 Plot	果皮厚度/mm Pericarp thickness	单果质量/g Single fruit mass	果实横径/mm Fruit horizontal diameter	果实纵径/mm Fruit vertical diameter	单坚果质量/g Single nut mass
宁国市胡乐镇 Hule Town of Ningguo City	5.80±0.33a	18.04±2.48b	32.29±1.20ab	35.88±2.57abc	4.90±0.59b
宁国市霞西镇 Xiaxi Town of Ningguo City	5.39±0.10ab	14.95±0.59c	30.65±0.47bc	34.14±1.14bc	3.98±0.21bc
宁国市仙霞镇 Xianxia Town of Ningguo City	5.45±0.52ab	15.93±0.31bc	31.93±1.21b	34.44±0.56c	4.95±0.42bc
宁国市南极乡 Nanji Township of Ningguo City	5.53±0.20ab	16.66±0.75bc	31.87±0.46b	34.20±0.88c	4.78±0.34bc
歙县杞梓里镇 Qizili Town of Shexian County	5.31±0.47ab	15.11±2.36bc	31.02±1.19b	34.99±1.29bc	4.25±0.35b
歙县岔口镇 Chakou Town of Shexian County	5.61±0.49ab	16.27±1.99bc	31.38±1.42b	35.82±1.17b	4.25±0.26b
歙县三阳镇 Sanyang Town of Shexian County	5.02±0.25b	15.09±1.30c	30.50±0.81bc	32.56±1.36cd	4.23±0.17bc
旌德县俞村乡 Yucun Township of Jingde County	5.38±0.19ab	17.19±0.80bc	31.68±0.56b	35.25±0.62b	4.29±0.11bc
旌德县云乐乡 Yunle Township of Jingde County	6.01±0.17a	21.71±2.98a	34.28±0.75a	39.72±1.92a	5.42±0.49a
绩溪县伏岭镇 Fuling Town of Jixi County	5.10±0.52b	13.10±1.74c	27.70±3.05c	31.30±3.41d	3.58±0.30c
绩溪县家朋乡 Jiapeng Township of Jixi County	6.23±0.58a	17.13±1.68bc	31.98±0.89b	34.75±1.39bc	4.63±0.29b
绩溪县荆州乡 Jingzhou Township of Jixi County	5.95±0.57a	16.78±1.98bc	31.70±1.26b	34.30±1.93bc	4.00±0.24bc
变异系数/% Coefficient of variation	8.83	14.16	5.97	6.68	6.68

样点 Plot	坚果横径/mm Nut horizontal diameter	坚果纵径/mm Nut vertical diameter	坚果壳厚度/mm Nut shell thickness	出籽率/% Seed yield rate	出仁率/% Kernel yield rate
宁国市胡乐镇 Hule Town of Ningguo City	20.77±1.23a	24.68±1.28ab	1.09±0.21a	27.15±1.44bc	47.68±1.89a
宁国市霞西镇 Xiaxi Town of Ningguo City	19.40±0.13bc	23.55±0.32bc	0.92±0.05bc	26.56±1.33abc	44.33±2.12bc
宁国市仙霞镇 Xianxia Town of Ningguo City	20.75±0.09ab	25.06±0.71ab	0.95±0.08bc	28.31±1.49a	47.78±1.98a
宁国市南极乡 Nanji Township of Ningguo City	21.03±0.43a	24.14±0.50b	0.93±0.05bc	28.03±1.44a	46.75±3.19ab
歙县杞梓里镇 Qizili Town of Shexian County	20.39±0.34b	23.36±0.60bc	0.97±0.05c	28.01±2.55abc	43.25±3.13c
歙县岔口镇 Chakou Town of Shexian County	20.11±0.39b	23.56±0.25bc	1.00±0.07abc	26.18±1.90bc	44.65±1.79bc
歙县三阳镇 Sanyang Town of Shexian County	19.51±0.23bc	22.63±0.25c	1.00±0.09abc	28.00±1.62abc	45.80±2.21bc
旌德县俞村乡 Yucun Township of Jingde County	20.38±0.31b	23.81±0.28bc	1.03±0.05abc	25.03±0.85bc	43.50±1.90c
旌德县云乐乡 Yunle Township of Jingde County	21.60±0.40a	25.75±1.20a	1.07±0.06abc	24.70±1.14b	48.10±2.85a
绩溪县伏岭镇 Fuling Town of Jixi County	19.23±0.53c	21.83±0.88c	1.00±0.11b	26.57±2.96abc	44.86±2.45bc
绩溪县家朋乡 Jiapeng Township of Jixi County	20.40±0.63b	23.93±0.67b	1.03±0.10abc	26.87±1.67bc	44.74±2.59bc
绩溪县荆州乡 Jingzhou Township of Jixi County	20.05±0.74b	23.30±0.68bc	0.98±0.07bc	24.43±2.33b	39.03±3.28d
变异系数/% Coefficient of variation	4.07	4.63	9.89	8.54	7.36

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference.

朋乡样点山核桃种仁的蛋白质含量最低,为 $91.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。绩溪县家朋乡样点山核桃种仁的粗脂肪含量最高,为 $548.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;歙县岔口镇、歙县杞梓里镇和旌德县俞村乡 3 个样点山核桃种仁的粗脂肪含量也较高,分别为 529.2 、 524.2 和 $522.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;绩溪县荆州乡样点山核桃种仁的粗脂肪含量最低,为 $468.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

从种仁粗脂肪中主要脂肪酸相对含量来看,宁国市仙霞镇样点山核桃的硬脂酸相对含量最高,为 4.25% ;宁国市南极乡、歙县岔口镇和歙县三阳镇 3 个样点山核桃的硬脂酸相对含量也较高,分别为 4.18% 、 4.09% 和 4.06% ;宁国市霞西镇样点山核桃的硬脂酸相对含量最低,为 3.78% 。旌德县云乐乡样点山核桃的棕榈酸相对含量最高,为 12.49% ;绩溪县家朋乡和绩溪县荆州乡 2 个样点山核桃的棕榈酸相对含量也较高,分别为 12.27% 和 12.20% ;旌德县

俞村乡样点山核桃的棕榈酸相对含量最低,为 11.63% 。绩溪县家朋乡样点山核桃的油酸相对含量最高,为 55.57% ;宁国市霞西镇样点山核桃的油酸相对含量次之,为 54.95% ;旌德县云乐乡样点山核桃的油酸相对含量最低,为 51.37% 。宁国市仙霞镇样点山核桃的亚油酸相对含量最高,为 28.93% ;旌德县俞村乡和旌德县云乐乡 2 个样点山核桃的亚油酸相对含量也较高,分别为 28.30% 和 28.15% ;绩溪县家朋乡样点山核桃的亚油酸相对含量最低,为 25.01% 。歙县岔口镇旌德县云乐乡 2 个样点山核桃的亚麻酸相对含量最高,均为 0.39% ;绩溪县荆州乡样点山核桃的亚麻酸相对含量最低,为 0.29% 。

由表 3 还可见:不同样点山核桃种仁的主要养分含量存在明显差异,变异系数为 $4.73\% \sim 22.35\%$,其中,粗脂肪中亚麻酸相对含量的变异系数最大,而其棕榈酸相对含量的变异系数最小。

表 3 皖南不同样点山核桃种仁主要养分含量的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Comparison on main nutrient contents in kernel of *Carya cathayensis* Sarg. from different plots in Southern Anhui ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

样点 ²⁾ Plot ²⁾	蛋白质	粗脂肪	粗脂肪中主要脂肪酸的相对含量/%					Relative content of main fatty acids in crude fat
	含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Protein content	含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Crude fat content	硬脂酸 Stearic acid	棕榈酸 Palmitic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	
P1	98.8±17.4bc	492.1±6.2c	3.94±0.06c	12.07±0.69ab	53.42±2.04ab	26.23±0.63b	0.36±0.11ab	
P2	116.5±22.6abc	491.1±23.2abc	3.78±0.21cd	12.00±0.34ab	54.95±3.26ab	25.71±3.66abc	0.36±0.08ab	
P3	112.0±16.3b	483.1±48.5abc	4.25±0.20a	11.97±0.60ab	51.46±2.76ab	28.93±4.31a	0.32±0.06b	
P4	128.4±26.3ab	470.1±18.5bc	4.18±0.16ab	11.72±0.16b	52.25±6.21ab	27.56±4.44ab	0.36±0.09ab	
P5	114.7±19.8abc	524.2±23.7a	3.86±0.16cd	11.83±0.35ab	53.46±3.38ab	27.88±3.38abc	0.31±0.06b	
P6	130.2±27.4a	529.2±44.8a	4.09±0.22bc	11.74±0.54ab	53.91±2.97ab	25.47±2.21bc	0.39±0.11a	
P7	101.1±14.0b	484.1±64.5abc	4.06±0.10bc	11.98±0.23ab	53.95±3.37ab	26.38±3.58abc	0.30±0.08b	
P8	97.8±7.1c	522.7±7.9a	3.95±0.22bc	11.63±0.44b	52.76±1.84ab	28.30±1.83ab	0.31±0.06b	
P9	100.1±2.6b	473.8±25.9abc	3.97±0.18bc	12.49±1.34a	51.37±1.92b	28.15±3.46a	0.39±0.12a	
P10	118.4±23.5abc	471.0±32.3bc	3.89±0.17c	11.71±0.40b	53.88±2.50ab	27.09±2.15ab	0.34±0.09ab	
P11	91.1±38.2bc	548.8±37.8a	3.86±0.14c	12.27±0.33ab	55.57±2.74a	25.01±2.61b	0.30±0.07b	
P12	129.7±17.1a	468.5±34.2bc	3.99±0.17bc	12.20±0.83ab	53.10±2.49ab	27.13±3.13ab	0.29±0.04b	
CV/%	7.29	21.75	4.82	4.73	5.37	10.93	22.35	

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

²⁾ P1: 宁国市胡乐镇 Hule Town of Ningguo City; P2: 宁国市霞西镇 Xiaxi Town of Ningguo City; P3: 宁国市仙霞镇 Xianxia Town of Ningguo City; P4: 宁国市南极乡 Nanji Township of Ningguo City; P5: 歙县杞梓里镇 Qizili Town of Shexian County; P6: 歙县岔口镇 Chakou Town of Shexian County; P7: 歙县三阳镇 Sanyang Town of Shexian County; P8: 旌德县俞村乡 Yucun Township of Jingde County; P9: 旌德县云乐乡 Yunle Township of Jingde County; P10: 绩溪县伏岭镇 Fuling Town of Jixi County; P11: 绩溪县家朋乡 Jiapeng Township of Jixi County; P12: 绩溪县荆州乡 Jingzhou Township of Jixi County. CV: 变异系数 Coefficient of variation.

2.3 皖南山核桃果实表型性状和种仁主要养分含量的 Pearson 相关性分析

2.3.1 果实表型性状间的 Pearson 相关性分析 皖南山核桃果实表型性状间的 Pearson 相关性分析结果见表 4。

由表 4 可见:果实横径与坚果横径和坚果纵径呈显著 ($P < 0.05$) 负相关,与果实纵径呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关;坚果横径与坚果纵径和坚果壳厚度呈显著负相关;坚果纵径与坚果壳厚度呈显著正相关;坚果壳厚度与出籽率和出仁率呈显著正相关;出籽率

表 4 皖南山核桃果实表型性状间的 Pearson 相关性分析结果¹⁾
Table 4 Result of Pearson correlation analysis on phenotypic characters of fruit of *Carya cathayensis* Sarg. in Southern Anhui¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient									
	PT	SFM	FHD	FVD	SNM	NHD	NVD	NST	SYR	KYR
PT	1.000									
SFM	0.025	1.000								
FHD	0.088	-0.087	1.000							
FVD	-0.075	0.099	-0.914**	1.000						
SNM	-0.121	-0.154	-0.127	-0.065	1.000					
NHD	-0.022	0.055	-0.251*	0.211	0.109	1.000				
NVD	0.094	0.086	0.120	-0.306*	0.011	-0.339*	1.000			
NST	0.104	0.079	-0.096	-0.029	-0.007	-0.271*	0.306*	1.000		
SYR	0.087	-0.064	-0.165	0.111	0.111	0.078	0.081	0.554*	1.000	
KYR	0.080	-0.056	-0.109	0.055	0.112	0.066	0.074	0.514*	0.813**	1.000

¹⁾ PT: 果皮厚度 Pericarp thickness; SFM: 单果质量 Single fruit mass; FHD: 果实横径 Fruit horizontal diameter; FVD: 果实纵径 Fruit vertical diameter; SNM: 单坚果质量 Single nut mass; NHD: 坚果横径 Nut horizontal diameter; NVD: 坚果纵径 Nut vertical diameter; NST: 坚果壳厚度 Nut shell thickness; SYR: 出籽率 Seed yield rate; KYR: 出仁率 Kernel yield rate. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$.

与出仁率呈极显著正相关;其他果实表型性状间的相关性均不显著。

2.3.2 种仁主要养分含量间的 Pearson 相关性分析
皖南山核桃种仁主要养分含量(包括蛋白质和粗脂肪含量以及粗脂肪中硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量)间的 Pearson 相关性分析结果见表 5。

由表 5 可见:大部分种仁主要养分含量间的相关性达到显著或极显著水平,其中,蛋白质含量与粗脂

肪含量以及油酸和亚油酸相对含量呈极显著正相关,与棕榈酸和亚麻酸相对含量呈显著正相关;粗脂肪含量与油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量呈显著正相关,与硬脂酸相对含量呈显著负相关;硬脂酸相对含量与棕榈酸相对含量呈显著正相关;棕榈酸相对含量与亚油酸相对含量呈显著正相关;油酸相对含量与亚油酸和亚麻酸相对含量呈显著正相关;亚油酸相对含量与亚麻酸相对含量呈显著正相关。

表 5 皖南山核桃种仁主要养分含量间的 Pearson 相关性分析结果¹⁾
Table 5 Result of Pearson correlation analysis on main nutrient contents in kernel of *Carya cathayensis* Sarg. in Southern Anhui¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient						
	C ₁	C ₂	RC ₁	RC ₂	RC ₃	RC ₄	RC ₅
C ₁	1.000						
C ₂	0.560*	1.000					
RC ₁	0.072	-0.495*	1.000				
RC ₂	0.512*	0.058	0.479*	1.000			
RC ₃	0.817**	0.604*	-0.069	0.222	1.000		
RC ₄	0.825**	0.691*	-0.174	0.238*	0.744*	1.000	
RC ₅	0.295*	0.346*	-0.179	-0.097	0.396*	0.351*	1.000

¹⁾ C₁: 蛋白质含量 Protein content; C₂: 粗脂肪含量 Crude fat content; RC₁: 硬脂酸相对含量 Stearic acid relative content; RC₂: 棕榈酸相对含量 Palmitic acid relative content; RC₃: 油酸相对含量 Oleic acid relative content; RC₄: 亚油酸相对含量 Linoleic acid relative content; RC₅: 亚麻酸相对含量 Linolenic acid relative content. **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$.

2.3.3 果实表型性状与种仁主要养分含量的 Pearson 相关性分析
皖南山核桃果实表型性状与种仁主要养分含量(包括蛋白质和粗脂肪含量以及粗脂肪中硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量)的 Pearson 相关性分析结果见表 6。

由表 6 可见:单坚果质量与油酸和亚油酸相对含

量呈显著正相关;坚果横径与蛋白质含量以及硬脂酸、油酸和亚油酸相对含量也呈显著正相关;而坚果纵径却与硬脂酸相对含量呈显著负相关;坚果壳厚度与蛋白质和粗脂肪含量以及油酸和亚油酸相对含量呈显著正相关,与硬脂酸相对含量呈显著负相关;出籽率和出仁率与蛋白质含量以及油酸、亚油酸和亚麻

表 6 皖南山核桃果实表型性状与种仁主要养分含量的 Pearson 相关性分析结果

Table 6 Result of Pearson correlation analysis on phenotypic characters of fruit with main nutrient contents in kernel of *Carya cathayensis* Sarg. in Southern Anhui

指标 ¹⁾ Index ¹⁾	相关系数 ²⁾ Correlation coefficient ²⁾						
	蛋白质含量 Protein content	粗脂肪含量 Crude fat content	硬脂酸相对含量 Stearic acid relative content	棕榈酸相对含量 Palmitic acid relative content	油酸相对含量 Oleic acid relative content	亚油酸相对含量 Linoleic acid relative content	亚麻酸相对含量 Linolenic acid relative content
PT	0.086	0.096	0.046	0.049	0.123	0.021	0.050
SFM	-0.080	-0.077	-0.067	-0.058	-0.006	-0.094	-0.196
FHD	-0.164	-0.112	0.091	0.018	-0.250	-0.142	-0.110
FVD	0.098	0.074	-0.054	-0.018	0.174	0.094	0.105
SNM	0.185	0.133	0.038	0.039	0.226*	0.233*	0.101
NHD	0.265*	0.008	0.227*	0.135	0.258*	0.236*	0.078
NVD	-0.023	0.040	-0.260*	-0.135	-0.003	-0.035	-0.077
NST	0.237*	0.516*	-0.601*	-0.111	0.338*	0.327*	0.108
SYR	0.748*	0.809**	-0.546*	0.137	0.716*	0.769*	0.394*
KYR	0.679*	0.875**	-0.421*	0.082	0.657*	0.716*	0.336*

¹⁾ PT: 果皮厚度 Pericarp thickness; SFM: 单果质量 Single fruit mass; FHD: 果实横径 Fruit horizontal diameter; FVD: 果实纵径 Fruit vertical diameter; SNM: 单坚果质量 Single nut mass; NHD: 坚果横径 Nut horizontal diameter; NVD: 坚果纵径 Nut vertical diameter; NST: 坚果壳厚度 Nut shell thickness; SYR: 出籽率 Seed yield rate; KYR: 出仁率 Kernel yield rate.

²⁾ **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$.

酸相对含量呈显著正相关,与粗脂肪含量呈极显著正相关,与硬脂酸相对含量呈显著负相关。

3 讨论和结论

植物天然群体形态特征变异丰富有利于其群体进化^[10]。本研究调查的皖南天然山核桃分布于北纬 29°51'46"至 30°46'55"、东经 118°30'01"至 119°19'20"区域,分布范围相对狭窄,但果实表型性状变异较丰富,以单果质量的变异系数最大(14.16%),坚果壳厚度的变异系数也较大(9.89%),而果皮厚度、果实横径、果实纵径、单坚果质量、坚果横径、坚果纵径、出籽率和出仁率的变异系数相对较小(均低于 9.00%),种仁的主要养分含量也存在较大变异,以亚麻酸相对含量的变异系数最大(22.35%),蛋白质含量的变异系数次之(21.75%),亚油酸相对含量的变异系数也较大(10.93%),而粗脂肪含量以及硬脂酸、棕榈酸和油酸相对含量的变异系数却相对较小(均低于 8.00%),这可能与本研究选择的样点范围相对狭窄有关,但具体影响因子还需扩大样点范围进行深入研究后才能确定。

山核桃种仁营养丰富,富含蛋白质和脂肪酸(包括饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸),其中,饱和脂肪酸中硬脂酸和棕榈酸含量较高,不饱和脂肪酸中单不饱和脂肪酸(如油酸)和多不饱和脂肪酸(如亚油酸和

亚麻酸)的含量也较高,尤其是多不饱和脂肪酸,不但是细胞膜的重要成分,而且具有预防心血管疾病、调节免疫系统和促进大脑发育等作用^[21-22]。研究结果^[21,23]表明:皖南地区不同样点山核桃种仁蛋白质含量为 9.11%~13.02%,明显高于浙江杭州和浙江新昌地区山核桃种仁蛋白质含量。本研究中,皖南 12 个样点山核桃的油酸相对含量最高,亚油酸相对含量次之,棕榈酸相对含量居中,硬脂酸相对含量较低,亚麻酸相对含量最低;然而,与其他地区山核桃种仁的油酸相对含量^[15,24-26]相比,本研究中皖南 12 个样点山核桃的油酸相对含量却偏低。本研究中皖南 12 个样点山核桃的亚油酸相对含量为 25.01%~28.93%,明显高于湖南^[22]和浙江^[24-27]山核桃的亚油酸相对含量。富含不饱和脂肪酸的坚果食品具有广阔的市场前景,深入研究皖南山核桃坚果在加工过程中不饱和脂肪酸等营养成分的变化及差异,对山核桃坚果产业的健康发展具有重大意义。

相关性分析结果显示:皖南山核桃的出籽率和出仁率与硬脂酸相对含量均呈显著负相关,与粗脂肪含量呈极显著正相关,与蛋白质含量以及油酸、亚油酸和亚麻酸相对含量呈显著正相关;坚果横径和坚果壳厚度与种仁主要养分含量多呈显著相关性,说明山核桃的坚果横径、坚果壳厚度、出籽率和出仁率能够影响其种仁的养分含量。

综上所述,皖南山核桃种仁的不饱和脂肪酸含量

较高,且不同样点果实表型性状和种仁主要养分含量存在明显差异,其中,单果质量、蛋白质含量以及亚油酸和亚麻酸相对含量的变异均较大,变异系数均在10.00%以上。总体来看,果实表型性状间的相关性不显著,但种仁主要养分含量间的相关性却显著;多数果实表型性状与种仁主要养分含量的相关性不显著,仅坚果横径、坚果壳厚度、出籽率和出仁率对山核桃种仁养分含量有显著影响。

致谢:旌德县、绩溪县、歙县和宁国市各级林业工作人员对本研究的野外调查和采样工作提供了大力帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 章亭洲. 山核桃的营养、生物学特性及开发利用现状[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(4): 90-93.
- [2] 黄坚钦, 章滨森, 王正加, 等. 中国山核桃属植物种间亲缘关系 RAPD 分析[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(4): 1-3, 11.
- [3] 王铁峰, 潘亚琴. 山核桃属植物外果皮的形态组织鉴定[J]. 中华中医药学刊, 2013, 31(1): 210-212.
- [4] 张旭东, 黄成林, 叶志琪. 大别山山核桃林植物组成与区系特征研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(增刊): 150-152.
- [5] 郭传友. 山核桃 (*Carya cathayensis*) 和大别山山核桃 (*C. dabieshanensis*) 生态及遗传多样性研究[D]. 南京: 南京林业大学森林资源与环境学院, 2004: 9-15.
- [6] 薛波. 大别山山核桃品种类型及其品质的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学茶与食品科技学院, 2013: 12-17.
- [7] 张鹏, 钟海燕, 姚小华, 等. 四种山核桃种仁含油率及脂肪酸组成比较分析[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(3): 499-504.
- [8] 郭传友, 黄坚钦, 王正加, 等. 大别山山核桃天然群体种实性状表型多样性[J]. 经济林研究, 2007, 25(3): 15-18.
- [9] 王宝庆. 四川西部核桃属植物遗传多样性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学林学院, 2007: 12-21.
- [10] 高乐旋, 陈家宽, 杨继. 表型可塑性变异的生态-发育机制及其进化意义[J]. 植物分类学报, 2008, 46(4): 441-451.
- [11] 陈军晓, 童敏, 程诗明, 等. 浙江省柿树种质资源表型多样性研究[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(4): 6-10.
- [12] 竺利波, 顾万春, 李斌. 紫荆群体表型性状多样性研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 138-145.
- [13] 齐静, 马庆国, 杨建民, 等. 中国核桃主要品种坚果缝合线特性研究[J]. 经济林研究, 2009, 27(2): 57-61.
- [14] 王金星, 潘刚, 王滑, 等. 西藏核桃叶片和坚果表型多样性及其相关关系研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(2): 236-240.
- [15] 夏国华, 朱先富, 俞春莲, 等. 不同地理种源大别山山核桃坚果表型性状和脂肪酸组分分析[J]. 果树学报, 2014, 31(3): 370-377.
- [16] HUANG J, ZHANG T, ZHANG Q, et al. The mechanism of high contents of oil and oleic acid revealed by transcriptomic and lipidomic analysis during embryogenesis in *Carya cathayensis* Sarg. [J]. BMC Genomics, 2016, 17: 113.
- [17] WANG Z, HUANG R, SUN Z, et al. Identification and profiling of conserved and novel microRNAs involved in oil and oleic acid production during embryogenesis in *Carya cathayensis* Sarg. [J]. Functional and Integrative Genomics, 2017, 17: 365-373.
- [18] XU Q, WU J, CAO Y, et al. Photosynthetic characteristics of leaves and fruits of hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) and pecan (*Carya illinoensis* K. Koch) during fruit development stages[J]. Trees, 2016, 30: 1523-1534.
- [19] 王绍忠, 方向宁. 安徽山核桃调查报告[J]. 经济林研究, 1991, 9(1): 33-37.
- [20] 沈显生, 张小平. 安徽省种子植物多样性研究[J]. 植物研究, 1997, 17(4): 413-420.
- [21] 于敏, 徐宏化, 王正加, 等. 6个薄壳山核桃品种的形态及营养成分分析[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(12): 74-77.
- [22] 唐琦, 余兆硕, 陈华东, 等. 湖南西部山核桃脂肪含量及脂肪酸组成研究[J]. 广州化工, 2016, 44(5): 82-84.
- [23] 于敏. 不同种质薄壳山核桃形态及营养成分分析[D]. 杭州: 浙江农林大学林业与生物技术学院, 2014: 29-35.
- [24] 俞春莲, 王正加, 夏国华, 等. 10个不同品种的薄壳山核桃脂肪含量及脂肪酸组成分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 714-718.
- [25] 夏玉洁, 姚小华, 任华东, 等. 22个山核桃无性系果实营养成分的比较分析[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(4): 49-55.
- [26] 常君, 李川, 姚小华, 等. 薄壳山核桃无性系含油率及脂肪酸组成分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(8): 51-57.
- [27] 陆浩, 杨会芳, 毕艳兰, 等. 山核桃油的理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2010, 35(5): 73-76.

(责任编辑: 佟金凤)